

(1) コンクリート充填鋼管はりの衝撃限界容量に関する一考察

防衛大学校土木工学科 ○伊藤一雄

〃 〃 高橋芳彦

〃 〃 大野友則

〃 〃 石川信隆

1. 緒言

砂防施設の一つとして、透過型鋼製砂防ダムがあるが、この砂防ダムは土石流先端部の巨礫を受け止める機能を有しており、この設計のためには、鋼製部材あるいは構造物全体の耐衝撃性能の評価が必要である。著者ら¹⁾は、鋼管スリットダムの耐衝撃性能の評価のための基礎的研究として、衝撃荷重を受けるコンクリート充填鋼管はりの衝撃曲げ実験を行ってきたが、コンクリート充填鋼管はりの耐衝撃設計には衝撃限界容量に関する理論的な解析も必要である。

本研究は、まず鉄筋コンクリートの理論を応用した断面分割法を用いて、ひずみ速度効果を考慮した動的曲げモーメント～曲率関係を求め、最大応力時のひずみから曲率限界を算出した。次に、単純支持されたコンクリート充填鋼管はりの動的荷重～変位関係を求め、これより衝撃限界エネルギー容量を算出した。さらに、これを実験結果と比較することにより、本解析手法の妥当性を検討した。

2. 断面分割法による静的M～φ関係の算定

(1) 応力の算定

コンクリート充填鋼管断面の曲げモーメント(M)～曲率(φ)関係を算定するには、まず図-1に示すような応力とひずみ分布より中立軸(x₀)を仮定する。次に断面をn個の水平な要素に切断すると、各要素の高さはD/n(D:鋼管径)となる。平面保持を仮定しているため、コンクリートも鋼管も同じひずみ分布となり、圧縮線のひずみε_cおよび引張線のひずみε_tはそれぞれ次のようになる。

$$\epsilon_c = -\phi \cdot x_0 \quad \epsilon_t = (D - x_0) \cdot \phi \quad (1a, 1b)$$

よって、i番目の要素のひずみε_{xi}は、次式のようになる。

$$\epsilon_{xi} = ((i-0.5) \cdot D/n - x_0) \cdot \phi \quad (2)$$

このときε_{xi} ≥ 0ならばε_{xi}は引張ひずみ、ε_{xi} < 0ならばε_{xi}は圧縮ひずみとなる。コンクリート充填鋼管のコンクリート部分および鋼管部分の応力を求めるには、各要素のひずみの値を図-2(a)、(b)に示すコンクリートおよび鋼管の応力～ひずみ関係式に照らし合わせてそれぞれのひずみに対応する応力を求める。まず、コンクリートの応力(σ_{ci})は引張応力を無視するので、圧縮ひずみ(ε_{xi} < 0)だけを考えればよく次式で与えられる。

1) コンクリートが最大応力に達するまで

$$(\epsilon_{xi}/\epsilon_{co}) \leq 1 \quad \sigma_{ci}/f_c = 2 \cdot ((\epsilon_{xi}/\epsilon_{co}) - (\epsilon_{xi}/\epsilon_{co})^2) \quad (3a)$$

2) コンクリートが最大応力に達した後

$$1 < (\epsilon_{xi}/\epsilon_{co}) \leq 1 + 1/K \quad \sigma_{ci}/f_c = 1 + K \cdot (1 - (\epsilon_{xi}/\epsilon_{co})) \quad (3b)$$

3) (ε_{xi}/ε_{co}) > 1 + 1/K

$$\sigma_{ci}/f_c = 0 \quad (3c)$$

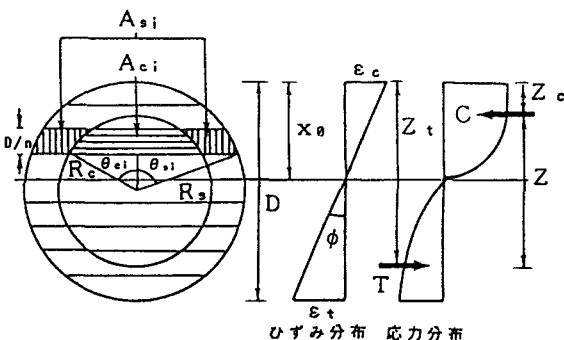


図-1 応力およびひずみ分布図

ただし、 ϵ_{x_i} : 各要素のひずみ、

ϵ_{cc} : コンクリート最大応力時のひずみ、

f_c : コンクリートの最大応力、

K : コンクリートの軟化勾配 ($K=0.005$)

次に、鋼管部分の応力は圧縮も引張もほぼ同じ強度をもつので、鋼管の応力 (σ_{s_i}) は次式で与えられる。

4) 鋼管が弾性域にある場合

$$|\epsilon_{y_i}| \leq \epsilon_y : \sigma_{s_i} = E_s \cdot \epsilon_{x_i}$$

5) 鋼管降伏後

$$\epsilon_y < |\epsilon_{x_i}| \leq \epsilon_u :$$

$$\sigma_{s_i} = f_y + (\epsilon_{x_i} - \epsilon_y) \cdot (f_u - f_y) / (\epsilon_u - \epsilon_y) \quad (4b)$$

ただし、 E_s : 鋼管のヤング係数、 f_y : 降伏応力、

f_u : 最大応力、 ϵ_y : 降伏時のひずみ、 ϵ_u : 最大応力時のひずみ

(2) コンクリート充填鋼管の各要素面積の算定

各要素に作用する合力を求めるために、図-1に示すコンクリート充填鋼管断面の各要素の断面積の算定が必要であり、以下のようにして求められる。

1) コンクリート部分の*i*番目の要素の断面積

$$A_{c_i} = (R_c^2 \cdot \theta_{c_i} - a_{c_i} \cdot b_{c_i}) - \sum A_{c_{i-1}} \quad (\theta_{c_i} \leq \pi/2) \quad (5a)$$

$$A_{c_i} = (R_c^2 (\pi - \theta_{c_i}) - a_{c_i} \cdot b_{c_i}) - \sum A_{c_{i-1}} \quad (\theta_{c_i} > \pi/2) \quad (5b)$$

ただし、 R_c : コンクリート部分の半径、 $a_{c_i} = |R_s - D \cdot i/n|$ 、

$$b_{c_i} = (R_c^2 - a_{c_i}^2)^{0.5}, \quad \theta_{c_i} = \tan^{-1}(b_{c_i}/a_{c_i})$$

2) 鋼管部分の*i*番目の要素の断面積

$$A_{s_i} = (R_s^2 \cdot \theta_{s_i} - a_{s_i} \cdot b_{s_i}) - \sum A_{s_{i-1}} - \sum A_{c_i} \quad (\theta_{s_i} \leq \pi/2) \quad (5c)$$

$$A_{s_i} = (R_s^2 (\pi - \theta_{s_i}) - a_{s_i} \cdot b_{s_i}) - \sum A_{s_{i-1}} - \sum A_{c_i} \quad (\theta_{s_i} > \pi/2) \quad (5d)$$

ただし、 R_s : 鋼管の半径、 $a_{s_i} = |R_s - D \cdot i/n|$ 、

$$b_{s_i} = (R_s^2 - a_{s_i}^2)^{0.5}, \quad \theta_{s_i} = \tan^{-1}(b_{s_i}/a_{s_i})$$

(3) 圧縮合力および引張合力の算定

各要素ごとの鋼管およびコンクリートの応力と断面積を掛けたものを積分すれば、圧縮合力 C および引張合力 T が次のように算定される。

$$C = \sum_{i=1}^n A_{c_i} \cdot \sigma_{c_i} + \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cdot \sigma_{s_i} \quad (6a) \quad T = \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cdot \sigma_{s_i} \quad (6b)$$

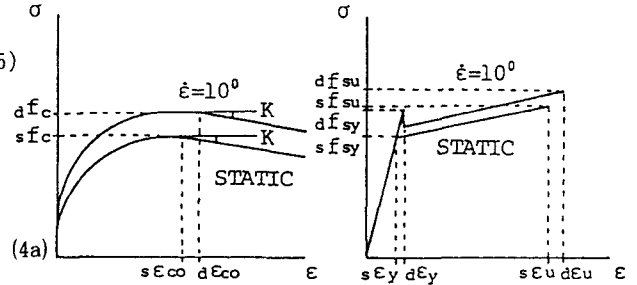
(4) 曲げモーメントの算定

上記で求めたコンクリート充填鋼管の断面に作用する圧縮合力 C および引張合力 T が、 $C = T$ を満足するように中立軸の位置 (x_0) を求める。その計算に当たっては、黄金分割法を用いた。

次に、曲げモーメント $M (= C Z = T Z)$ を求めるために、圧縮合力と引張合力の重心間距離 $Z (= Z_t - Z_c)$ を求める。いま、圧縮縁からの距離を x_i とすれば、圧縮、引張合力の重心の位置 Z_c および Z_t はそれぞれ次のように求められる。

$$Z_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i}{C} \quad (7a)$$

$$Z_t = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot x_i}{T} \quad (7b)$$



(a) コンクリート (b) 鋼管

図-2 ひずみ速度効果を考慮した 応力~ひずみ関係モデル

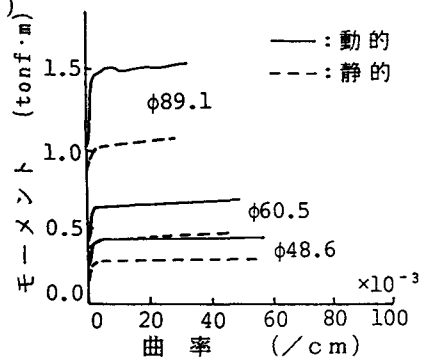


図-3 曲げモーメント~曲率関係 (動的は $\dot{\epsilon}_t = 10^0/s$ の場合を示す)

ただし、 C_i : 各要素の圧縮合力、 T_i : 各要素の引張合力、
 x_i : 圧縮縁から各要素の重心までの距離 ($x_i = D \cdot (i-0.5)/n$)

よって、合力重心間距離 Z は $Z = Z_t - Z_c$ となり、曲げモーメント M は $M = C \cdot Z = T \cdot Z$ から得られる。
 以上の解析法によって得られる静的 $M \sim \phi$ 関係の一例を図-3 に示す。

3. ひずみ速度効果を考慮した動的 $M \sim \phi$ 関係の算定

衝撃荷重を受ける構造物の材料は、ひずみ速度の増大とともに応力が上昇する特性があり、動的な解析を行うためには、ひずみ速度効果を考慮した材料の応力～ひずみ関係を用いる必要がある。そこで本研究では、前述の静的解析法に材料のひずみ速度効果を考慮した応力～ひずみ関係を導入することにより、コンクリート充填鋼管の動的 $M \sim \phi$ 関係の算定を行う。

(1) 鋼管のひずみ速度効果を考慮した応力～ひずみ関係

一般鋼材のひずみ速度効果は上昇伏点および下降伏点の上昇に影響を及ぼし、縦弾性係数には殆ど影響しないことが報告されている。ここでは、次式のように高橋ら²⁾によって提案された図-4のような、上降伏点変化率 ($d f_{sy} / s f_{sy}$) および下降伏点・引張強度・破断ひずみ変化率 (d/s) を用いる。ここで、係数 a および b は表-1 に示すとおりで、ひずみ速度の範囲は $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \sim 10^0$ (/sec) である。

$$d f_{sy} / s f_{sy} = 10^{0.3796 \cdot \log \dot{\epsilon} - 0.2579} + 0.993 \quad (8a)$$

$$d/s = a + b \cdot \log \dot{\epsilon} \quad (8b)$$

ただし、 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度、 $d f_{sy}$: 動的上昇伏点、 $s f_{sy}$: 静的降伏点、
 d : 動的 (下降伏点・引張強度・破断ひずみ)、
 s : 静的 (下降伏点・引張強度・破断ひずみ)

(2) コンクリートのひずみ速度効果を考慮した応力～ひずみ関係

コンクリートのひずみ速度効果に関する研究は、国内外において古くから行われているが、ここでも、次のような高橋ら²⁾によって提案された、ひずみ速度によるコンクリートの圧縮強度の変化率 ($d f_c / s f_c$) および最大応力時のひずみの変化率 ($d \epsilon_{co} / s \epsilon_{co}$) を用いる。

$$d f_c / s f_c = 1.49 + 0.268 \cdot (\log \dot{\epsilon}) + 0.035 \cdot (\log \dot{\epsilon})^2 \quad (9a)$$

$$d \epsilon_{co} / s \epsilon_{co} = 1.24 + 0.0053 \cdot (\log \dot{\epsilon}) \quad (9b)$$

(3) 動的 $M \sim \phi$ 関係の算定

まず任意の要素のひずみの大きさ ϵ_{x_i} は、式(2)で与えられ、また任意要素のひずみ速度は次式によって求められる。

$$\dot{\epsilon}_{x_i} = d \epsilon_{x_i} / dt = ((i-0.5) \cdot D / n - x_0) \cdot \dot{\phi} \quad (10)$$

ただし、 $\dot{\phi}$: ($= d\phi / dt$) 曲率速度

次に、各断面での ϕ と $\dot{\phi}$ ($\dot{\phi} = \dot{\epsilon}_t / (D/2)$ とし、一定とする) を与え、中立軸 (x_0) を仮定すれば、断面の各要素における ϵ_{x_i} 、 $\dot{\epsilon}_{x_i}$ が式(2)、(10) から求められる。よって、あるひずみ速度 $\dot{\epsilon}_t$ に対応する応力は、コンクリート充填鋼管の材料の応力～ひずみ関係式 (式(3)、(4)、(8)、(9)) より算定できる。そこで、断面力の釣合 ($C = T$) を満足する

かどうかの判定を行って中立軸 (x_0) を決定する。この繰返し計算によって、あるひずみ速度 $\dot{\epsilon}_t$ のもとでの動的 $M \sim \phi$ 関係が算定できる。この解析によって得られた動的 $M \sim \phi$ 関係の一例を図-3 に示す。この時の曲率 (ϕ) の最大値を限界曲率とする。

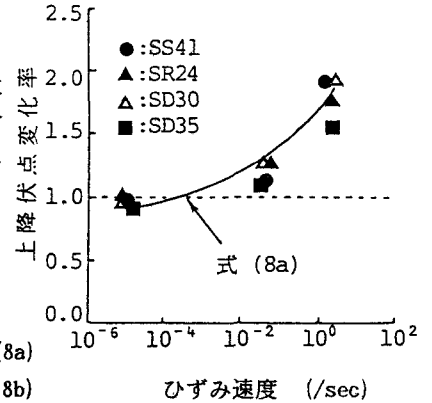


図-4 鋼材の上降伏点変化率

表-1 ひずみ速度係数

	a	b
下降伏点	1.202	0.040
引張強度	1.172	0.037
破断ひずみ	1.044	0.013

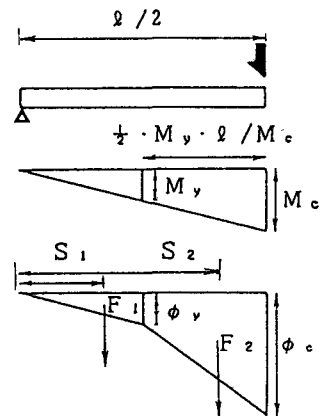


図-5 モーメント・曲率分布

4. 動的荷重～変位関係と衝撃限界容量の算定

(1) 荷重～変位関係

ここでは、高速載荷実験¹⁾と比較するために、図-5に示すような単純支持されたコンクリート充填鋼管はりに中央集中荷重が作用する場合の荷重Pと中央点変位δを求める。まず荷重Pは次式で表わされる。

$$P = 4 \cdot M_c / l \tag{11}$$

ただし、 M_c ：中央点の曲げモーメント

次に、変位δは図-5に示す曲率分布を仮定して、モールの定理より次式のように算出される。

1) 弾性域内 ($\epsilon_t \leq \epsilon_y$) : $\delta = \phi \cdot l^2 / 12$ (12)

2) 降伏以降 ($\epsilon_y < \epsilon_t < \epsilon_u$) :

$$\delta = F_1 \cdot S_1 + F_2 \cdot S_2 \tag{13}$$

ただし、 $F_1 = \frac{1}{2} \cdot \phi_y \cdot M_y \cdot l / M_c$ 、 $S_1 = \frac{1}{2} \cdot M_y \cdot l / M_c$ 、

$F_2 = \frac{1}{2} (\phi_c + \phi_y) \cdot (l - M_y \cdot l / M_c)$ 、

$S_2 = \frac{1}{2} (\frac{1}{2} \cdot (2\phi_c + \phi_y) \cdot l / (\phi_c + \phi_y) - M_y \cdot l / M_c) + \frac{1}{2} \cdot M_y \cdot l / M_c$ 、

F_1, F_2 は曲率分布荷重、 S_1, S_2 はその重心位置

図-6(a)、(b)は静のおよび動的なP～δ関係の解析結果を示したもので、実験結果と比較している。ただし、鋼管の限界ひずみは、 $\epsilon_u = 13.5\%$ を用いて計算した。まず荷重に関しては各鋼管径共に実験値をほぼ良好にシミュレートしている。また終局変位に関しても、各鋼管径について多少ばらついてはいるがほぼ実験値と近い値を示しており、これを限界変位としても良いと考えられる。

(2) 衝撃限界容量の算定

上記の動的P～δ関係から限界変位 δ_m までの面積を積分すると、衝撃限界吸収エネルギーが得られ、これを衝撃限界容量として表-2に実験結果と比較した。やや実験値と合わない鋼管径も見られるが、おおむね一致することが認められる。

5. 結論

本研究では、断面分割法を用いて断面のM～φ関係を求め、これより動的荷重～変位関係ひいてはコンクリート充填鋼管はりの衝撃限界エネルギー容量を算出したものである。これより以下の結論が得られる。

(1) 静的解析および動的解析ともに、荷重・変位ともほぼ実験値と一致しており、この解析方法の妥当性が認められた。

(2) 本解析で得られた衝撃限界吸収エネルギーは、実験から得られた値とおおむね一致しており、これをコンクリート充填鋼管はりの衝撃限界容量とみなしても良いと考えられる。

今後、この解析法を応用して、中空鋼管はりの衝撃限界容量についても検討していく予定である。

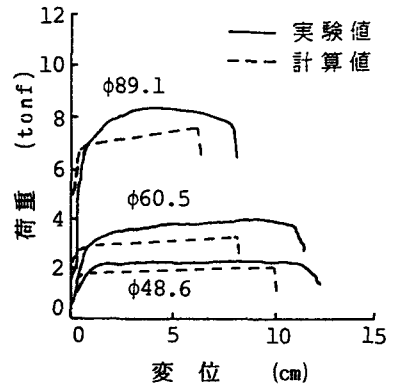


図-6(a) 静的荷重～変位関係

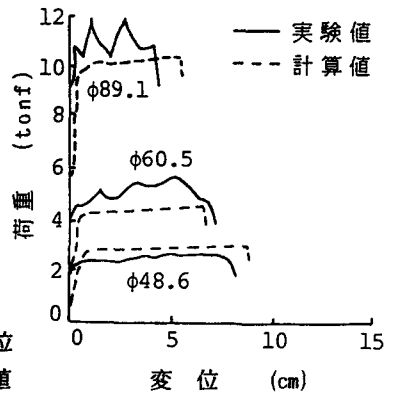


図-6(b) 動的荷重～変位関係

表-2 衝撃限界吸収エネルギー

鋼管径	φ 48.6	φ 60.5	φ 89.1
実験値	54.1	40.5	26.1
解析値	56.3	27.8	24.4

単位 (tonf·cm)

参考文献: 1) 伊藤・石川・川嶋・鈴木: 衝撃荷重を受けるモルタル充填鋼管はりの終局限界について; 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集1, pp.498~499, 1990年10月
 2) 高橋ら: ひずみ速度効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの衝撃曲げ応答解析; 構造工学論文集 Vol. 32A, pp.669~681, 1986年3月